

Литература

1. Лозгачев Г. И., Морозов Г. А., Ярославцев С. В. Методика синтеза скалярных законов регулирования нелинейных одномерных систем. - Воронеж: ДП ТН, 2001.

УДК 629.7.036.3.001

КОНВЕРТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ И КОРАБЕЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СТАЦИОНАРНЫЕ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлено краткое содержание книги (в двух частях), посвященной конвертированию авиационных и судовых газотурбинных двигателей в стационарные установки для выработки электроэнергии и перекачки газа. В первой части рассмотрено термогазодинамическое проектирование газотурбинного двигателя, включающего трехмерный анализ потока в основных элементах машины. Вторая часть содержит данные относительно методов увеличения ресурса и оценки параметров надежности стационарных установок, а также о методах их вычисления

Книга предназначена для специалистов в области газотурбостроения, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей высших учебных заведений

Ключевые слова: двигатель, схема, ресурс, надежность, эффективность

The summary of the book (in two parts), devoted is presented to converting aviation and ship gas-turbine engines to stationary installations for development of the electric power and swapping of gas. In the first part it is considered thermodynamics designing gas-turbine the engine including the three-dimensional analysis of a stream in basic elements of the machine. The second part contains data concerning methods of increase in a resource and an estimation of parameters of reliability of stationary installations, and also about methods of their calculation

The book is intended for experts in the field of gas-turbo plant, and also for students and post-graduate students of corresponding specialties of higher educational institutions

Keyword: engine, scheme, resource, reliability, efficiency

Ю.М. Ануров

Доктор технических наук, генеральный конструктор
ОАО «ГТ ТЭЦ ЭНЕРГО»
г. Санкт-Петербург, Россия

В.А. Коваль

Доктор технических наук, координатор
НТЦ прогрессивных технологий НАН Украины
г. Харьков, Украина

Г.П. Нагога

Доктор технических наук, заместитель генерального
конструктора
НПО «Сатурн»
г. Рыбинск, Россия

В.В. Романов

Кандидат технических наук, технический директор
ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект»
г. Николаев, Украина
Контактный тел.: 8 (0512) 49-36-34

С.Г. Валухов

Доктор технических наук, профессор, генеральный
конструктор-генеральный директор
ФГУП «Турбонасос»
ул. Острогжская, 107, г. Воронеж, Россия, 394052

Часть 1. Термогазодинамическое проектирование

В первой главе книги раскрыты основные принципы конвертирования авиационных ГТД и пути реали-

зации газотурбинных технологий в энергетических объектах, включая современные и перспективные технологии. При этом обоснованы основные требования, предъявляемые в процессе конверсии. Рассмотрены

термогазодинамические и конструктивные особенности приводных газотурбинных двигателей и установок, а также различные схемные решения при конвертировании авиационных ГТД в стационарные ГТУ. На примере серийного ТРДД небольшой двухконтурности с подпорными ступенями проанализированы возможные его производные для энергетики и перекачки газа. Уделено должное внимание перспективным разработкам с применением различных надстроек к простому термодинамическому циклу: процессам с воздушно-турбинным двигателем (рис.1) и пароводородным силовым циклом. В последнем случае рассматриваются схемы ГТУ с использованием водорода для перегрева пара. Проанализированы схемы с паровым реформингом, применяемым для получения синтетического газа, а также низкотемпературным топливным элементом с электролизером. Приведены данные по выполненным проектам ведущих предприятий России и Украины. Сопоставлены энергетические возможности ГТУ.

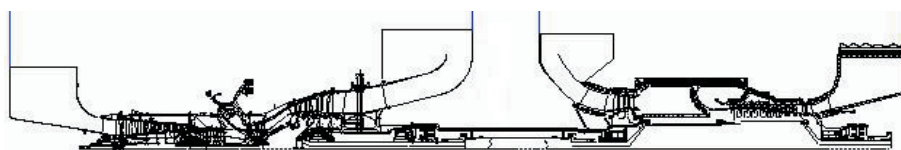


Рис. 1. Конструктивная схема ГТУ с воздушно-турбинным двигателем

Вторая глава посвящена расчету параметров термодинамического цикла газотурбинных и парогазовых энергетических установок, работающих по циклам различной конфигурации. С целью принятия экономически обоснованных решений при использовании газотурбинной техники приведены методики расчета стоимости жизненного цикла конвертированного изделия, а также определение эффективности ГТУ при ее комбинированной работе. Описаны выбор параметров и алгоритм теплового расчета ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением рабочего тела при его сжатии и подогревом в процессе расширения, а также регенерацией тепла. Рассмотрена и методика теплового расчета конвертированного ТРДД с воздушно- турбинным циклом. При этом отображены подходы к определению энергетических характеристик топлива и термодинамических параметров продуктов сгорания. Уделено внимание математическому моделированию ГТД с целью исследования их эксплуатационных характеристик на установившихся и переходных режимах работы. В этой части работы описаны общие требования к построению математических моделей ГТД и уровни моделирования объектов. Представлены математические модели элементов проточной части двигателя и его лопаточных машин первого уровня моделирования (с возможностью перепуска воздуха и поворота направляющих лопаток). Изложены основные подходы к организации вычислительного процесса при решении системы уравнений невязок приводных ГТД различных конструктивных схем. Раскрыты принципы идентификации математической модели по результатам испытаний двигателя.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с утилизацией тепла отработанных газов машины. Здесь произведен выбор параметров термодинамиче-

ского цикла приводного ГТД, работающего с теплоутилизационными контурами (ТУК) одного, двух и трех давлений, а также выполнено сопоставление энергетических показателей этих циклов. Дан анализ парогазового цикла STIG и описаны методики тепловых расчетов парогенераторов разных давлений и особенности алгоритма расчета когенерационной установки с подачей пара в камеру сгорания. Приведены примеры выполненных установок. Отдельное место занимает вопрос увеличения энергетических параметров ГТД путем впрыска воды в проточную часть компрессора. Здесь отображены результаты исследований по влиянию места впрыска воды в компрессор ГТУ ГТ – 009, ее количества на увеличение мощности установки и КПД. Даны рекомендации по организации оптимального впрыска в зависимости от типа компрессора, условий его работы, числа и расположения выбранных мест ввода воды в проточную часть.

В четвертой главе отображены вопросы, связанные с начальным этапом газодинамического проектирования основных узлов и элементов проточной части ГТД. При стремлении максимально сохранить без изменения конструкцию конвертируемого авиационного двигателя, примерно 20...30% основных деталей и узлов требует конструктивного изменения. К их числу относятся осевой компрессор (добавление группы первых или последних ступеней), камера сгорания, а также входное и выходное устройства. Турбину нового двигателя стремятся скомпоновать из лопаточных венцов исходного ГТД. В связи с этим в разделе уделено внимание выбору параметров и расчету решеток профилей компрессора и формированию рационального облика указанных основных элементов проточной части машины. При этом приведены обобщения результатов продувок решеток профилей, включая их характеристики при больших дозвуковых скоростях, рекомендации по проектированию малотоксичной камеры сгорания и входных/выходных устройств.

Пятая глава посвящена 3-D анализу течения в основных элементах проточной части и корректировке их размеров в целях минимизации гидравлических потерь и снижения вредных выбросов в камере сгорания. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса CFX ANSYS, основанного на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и использованием моделей турбулентной вязкости. Рассмотрены основные математические соотношения, как основной модели, так и различных моделей турбулентной вязкости. Проведено сопоставление этих моделей. В качестве примеров представлены результаты расчетов основных элементов проточной части (рис. 2). В целях проверки адекватности программного комплекса CFX выполнено его тестирование на высоконагруженной ступени вентилятора в широком диапазоне режимов, включая предсрывные. Для повышения надежности описания режимов, предшествующих вращающемуся срыву, разработана двухмерная модель течения в плоскости S_2 с учетом особенностей формирования профильного и торцевого пограничных слоев.

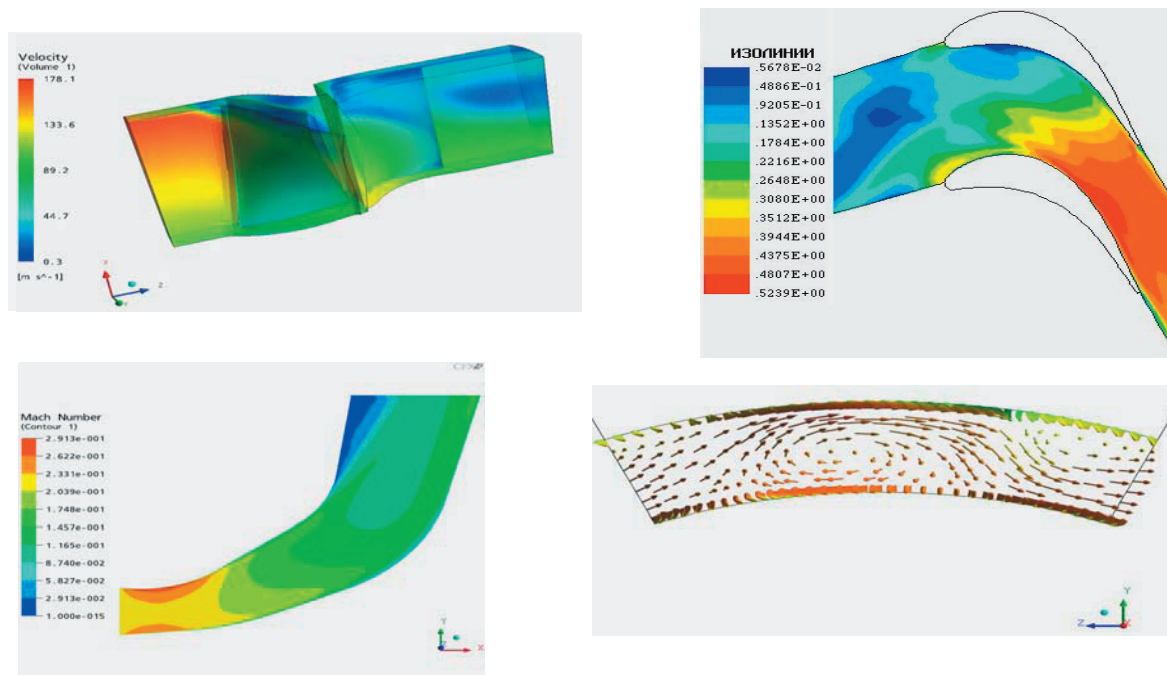


Рис. 2. Примеры 3-D моделирования течения в проточной части ГТД

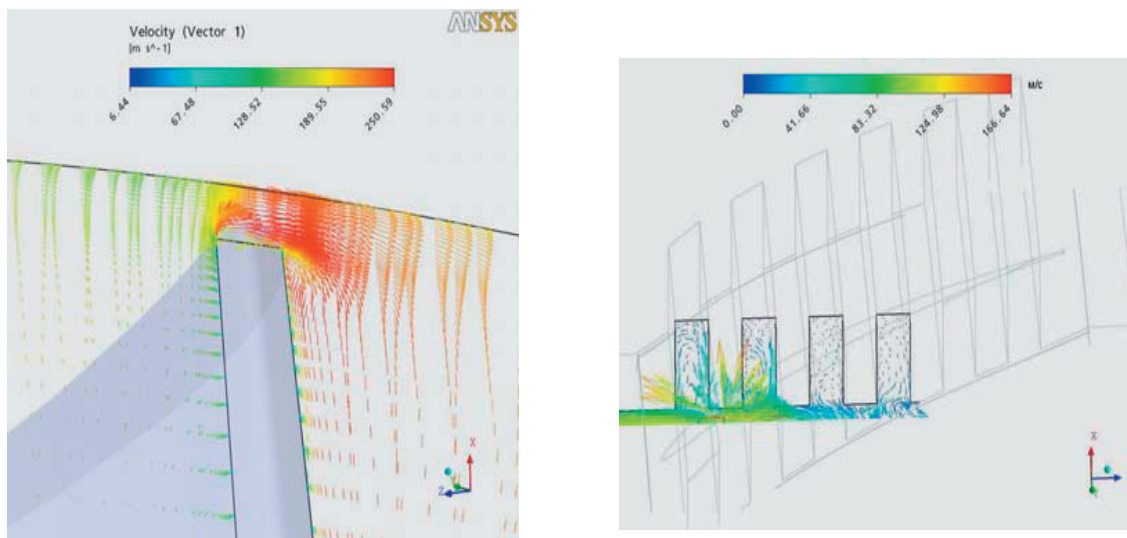


Рис. 3. 3-D картина течения у концов рабочих лопаток

Рассмотрено применение 3-D программного комплекса для анализа возможности повышения КПД осевого компрессора путем пассивного управления течением у концов рабочих лопаток (рис. 3).

Часть 2. Особенности ресурсного проектирования ГТД

В шестой главе изложены основные принципы конструирования охлаждаемых лопаток газовых турбин с интенсификацией теплоотдачи в каналах охлаждения. Это связано с тем, что вследствие термомеханической

и вибрационной напряженности лопатки турбин в значительной мере ограничивают межремонтный ресурс двигателя. Обеспечение высокого ресурса для конвертированных ГТД (более 100 тыс. часов) определяет применение новых проектных решений – ограниченных вихревых трактов и обтекаемых поверхностей, сформированных упорядоченными рельефами из сферических углублений (рис. 4). При этом выполнен расчетно-экспериментальный анализ для глубины охлаждения Θ и рассмотрена эффективность различных способов интенсификации охлаждения в увеличении долговечности рабочих лопаток газовых турбин.

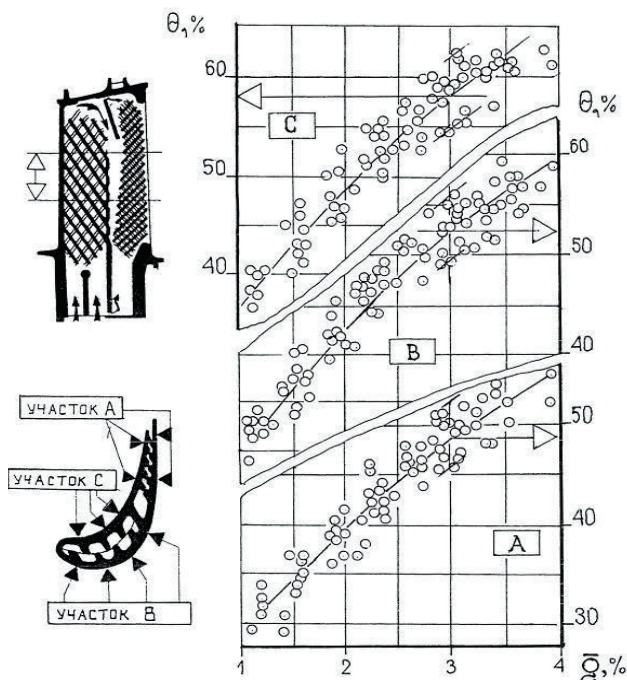


Рис. 4. Влияние относительного расхода воздуха на глубину конвективного охлаждения характерных участков оболочки рабочей лопатки с «вихревыми» трактами для трех поперечных сечений в центральной трети ее высоты

Седьмая глава посвящена проблеме теплозащитных покрытий рабочих лопаток (ТЗП) газовых турбин. Раскрыты типы ТЗП, их физико-химические свойства, а также методы нанесения покрытий. Описан механизм разрушения ТЗП в условиях работы ГТУ. Приведена методика оценки теплового состояния оребренной стенки охлаждаемой лопатки с ТЗП. Определены подходы по оценке ресурса лопаточного аппарата турбины с ТЗП при длительных статических и циклических нагрузках, а также его работоспособности в условиях коррозионно-эрозионного воздействия высокоскоростного газового потока. Показаны условия термомеханического разрушения ТЗП. Рассмотрены вопросы, связанные с напряженным состоянием керамического покрытия и оценки ресурса керамического слоя ТЗП (рис. 5). Представлена методика оценки эквивалентности испытаний и эксплуатации по критерию истощения ресурса слоя ТЗП.

В восьмой главе отражены вопросы надежности при создании (проектировании) ГТД. Здесь раскрыты основные понятия и определения, а также приведены методики расчета различных показателей надежности объекта. Приведенные материалы содержат и метод расчета показателей надежности автономных многоблочных газотурбинных ТЭЦ. ГТД ТЭЦ, рассматриваются как сложные технические объекты ответственного назначения, нарушение функционирования которых вызывает значительный экономический ущерб и может иметь негативные социальные последствия. Это обуславливает повышенные требования к

надежности проектируемых объектов. Для обоснования таких требований разработана соответствующая методика расчета нормативных значений коэффициента готовности и максимально допустимой вероятности аварии объекта в зависимости от величины возникающего ущерба (рис. 6).

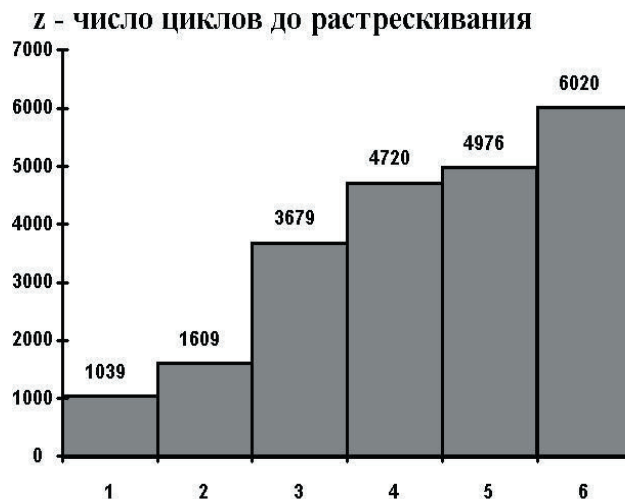


Рис. 5. Результаты испытаний образцов из сплава ЖС6У на термостойкость в продуктах сгорания топлива по режиму $t = 200-1000-200\text{ }^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{H}} - \tau_0 = 30\text{ с}$):

1 - без покрытия; 2 - алитирование;
3 - основа Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y (60мкм);
4 - основа Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y (80мкм) + Ni-16 % Cr-11 % Al-8 % Co-0,05 % Y (20мкм);
5, 6- основа Ni-17 % Cr-8 % Al-0,05 % Y (40мкм) + Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y + [Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y + 2 % ZrO₂ - 8 % Y₂O₃] (80мкм) толщина микрослоев в вариантах 5 и 6 соответственно 2...3 мкм и 0,5...1 мкм

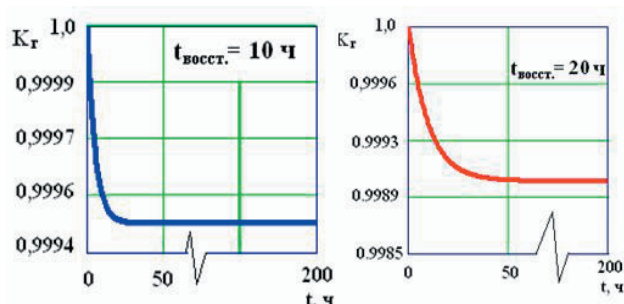


Рис. 6. Зависимость коэффициента готовности ГТЭ от наработки при различном времени восстановления после отказа

С помощью созданной модели решаются не только задачи оценки и анализа надежности создаваемого объекта, но и задача его частичного синтеза, например, за счет введения (или исключения) избыточного структурного резервирования.